

福井県における突風発生の特徴

Climatological Characteristics of Possible Gust in Fukui Prefecture

三浦 麻*
(福井大学教育地域科学部地域政策講座)

1. はじめに

近年、日本列島は大気的不安定な状態の下で発生する気象じょう乱によって、前線、台風、豪雨、突風等による凄まじい気象災害が高頻度で生じている。これにより、被害地域の多くの人々が住家を奪われるだけでなく人的被害を受け、不自由な避難生活を余儀なくされている。最近約 10 年間に於いて、激しい気象現象によって発生した全国の気象災害のうち、規模が大きく、社会的な関心・影響が高い事例(気象庁, 2001-2012)をみると、台風や前線に伴う局地的な大雨や強風被害が相次いでいる。そのうち、2012 年に生じた竜巻等突風被害(気象庁速報値 2012 年 8 月 30 日現在)を表 1 に示す。竜巻については、この半年間に陸上で発生したものは 20 件に及び、海上で生じたものを合わせると 26 件に達する。表 1 には陸上で生じたもののみを掲載しているが、西日本から東日本までの広範囲で住家の損壊等の被害が生じていることがわかる。もっとも甚大な被害を及ぼしたものは、2012 年 5 月上旬に北関東で複数同時発生した竜巻であり、観測史上で記録的なスケールの現象であった。

日本では 1 年あたりの竜巻発生数が米国の約 50 分の 1 であり、頻発性からみるとそう多くはないように思えるが、国土面積からみると発生率が低い国であるとはいえない(水野ら, 2007)。また、発達した積乱雲から生まれる突風現象は、その空間スケールが小さく、短寿命であるために、予測を難しくしている。そのため、突風現象に対する対策は進んでいない。気象庁の情報によって発令される自治体の注意喚起は防災上において極めて重要であるが、加えてそれぞれの地域における現象発生の頻発性、規模等の地域性を把握しておくことは、住民個々の危機管理を備えるためには必要である。すなわち、突風現象のように、突発的に生じる現象に対しては、地域に住む住民がその土地に生じる気象現象の特性を経験的な知識に加えて、利用可能な気象情報をもとに行動することが重要となる。

本研究では、気象庁気象官署で観測されたデータおよび気象庁で解析された竜巻データに基づいて全国における過去に生じた竜巻発生の特徴の地域性を検討し、さらに、福井県内における気象官署のデータと過去に生じた竜巻等突風現象の事例および突風発生の気候学的特徴について考察する。

2. 竜巻等の突風現象の発生場とスケール

2.1 じょう乱の特徴

竜巻のような激しい突風現象は、非常に発達した積乱雲の中から生まれることが多い。積乱雲は対流性の雲で鉛直方向に発達したものであり、個々の積乱雲の直径は数 km 程度である(小倉, 1997)。風の鉛直シアと対流不安定が十分に大きい場合には、数時間持続する強大な単一セルに成長する。そのときの直径は 20~30 km にもおよぶ巨大な雄大積乱雲となり、これをスーパーセルと呼ぶ(図 1)。

(キーワード: 竜巻, 突風率, 積乱雲, 地域特性, 総観場)

*Asa Miura (気象予報士, CAMJ: Certified and Accredited Meteorologist of Japan)

(Department of regional policy, Faculty of Education and Regional Studies, University of Fukui, Fukui, 910-8507)

表 1 2012 年に発生した全国の竜巻等突風現象(陸上発生のみ、気象庁速報値)2012.8.30 現在

現象区別	発生日時	発生場所	藤田スケール	総観場	その他
竜巻	2012/8/14	高知県 安芸市	F0	停滞前線・暖気の移流	ビニールハウス一部損壊、住家の屋根瓦のめくれなど
ガストフロント	2012/8/6	愛知県 春日井市	F0	気圧の谷・暖気の移流	
ガストフロント	2012/8/6	新潟県 新潟市	F1	気圧の谷・寒気の移流	樹木の幹折れやコンクリート製の電柱の折損
ダウンバースト	2012/7/31	北海道 空知郡上富良野町	F0	気圧の谷・暖気の移流	住家屋根のトタン剥離、樹木の枝折れなど
竜巻	2012/7/31	北海道 網走市	F1	気圧の谷・寒気の移流	倒木、樹木の幹折れなど
ダウンバースト	2012/7/31	北海道 北見市	F1	気圧の谷・寒気の移流	樹木の幹折れなど
ダウンバースト	2012/7/31	北海道 常呂郡佐呂間町	F1	気圧の谷・寒気の移流	樹木の幹折れなど
ダウンバースト	2012/7/28	群馬県 安中市	F0	雷雨(熱雷)	倉庫のトタン屋根の飛散や樹木の折損
ダウンバースト	2012/7/17	栃木県 栃木市	F0	暖気の移流	住家等の一部損壊、倒木など
竜巻	2012/7/12	高知県 安芸郡芸西村	F0	梅雨前線	ビニールハウス一部損壊など
竜巻	2012/7/5	青森県 弘前市	F1	寒気の移流	住家の屋根飛散、倒木や樹木の幹折れ
竜巻	2012/6/5	沖縄県 島尻郡南大東村	F0	台風	非住家のトタン屋根の飛散等
竜巻	2012/6/2	奈良県 生駒郡斑鳩町	F0	気圧の谷	住家の屋根瓦のめくれ等
竜巻	2012/5/6	栃木県 真岡市	F1～F2	気圧の谷、寒気の移流	住家損壊等
竜巻	2012/5/6	茨城県 常総市	F3	気圧の谷、寒気の移流	住家の転倒等
竜巻	2012/5/6	茨城県 筑西市	F1	気圧の谷、寒気の移流	樹木の幹折れ、ビニールハウスの倒壊
竜巻	2012/5/6	福島県 大沼郡会津美里町	F0	気圧の谷、寒気の移流	住家トタン屋根のはがれ、ビニールハウスの倒壊等
竜巻	2012/2/28	沖縄県 うるま市	F0	停滞前線	海上で発生した竜巻が上陸
塵旋風(つむじ風を含む)	2012/2/19	茨城県 常陸太田市	F0	その他(高気圧)	住家屋根瓦の捲れ
竜巻	2012/2/1	島根県 出雲市	F0	寒冷前線	住家の屋根瓦の捲れ、トタン屋根の飛散など

なお、単一の積乱雲が集まって生成した数個の積乱雲が不規則に並んだ対流雲の塊（マルチセルまたは多重セル）もスーパーセルほどの大きさを持つことがある。この場合も、雹・突風などのじょう乱を引き起こすことがある。

積乱雲は強い降雨と地上における激しい突風によって特徴づけられる雷雨を伴い、さらに発達した積乱雲からは、竜巻やダウンバースト、ガストフロントの激しい突風をもたらす現象が発生する。以下に、それぞれの特徴を記述する。

(1) 竜巻

積乱雲に伴う強い上昇気流により発生する鉛直軸を持つ激しい渦巻きで、多くの場合、漏斗状または柱状の雲を伴う。竜巻には水上で発生するものと陸上で発生するものがある（藤田，1974）。水上竜巻については、親雲にまで発達するための海面温度が必要であり、気温よりも高いことが条件となる。冬の季節風下の日本列島や夏の日中の熱帯海上がそれにあたる。また、海面近くの風に異なる方向の流れや渦があることがもうひとつの条件であり、沿岸近くの島や岬の影響を受けて気流の乱れが渦を発生させる。一方、陸上竜巻の多くは、雷や強い降雨現象に前後して発生する。親雲は、かなとこ（アンヴィル）状の積雲、すなわち積乱雲（雷雲）まで発達した巨大な積乱雲全体が回転している（図 1）。

竜巻発生メカニズムには 2 通りあると考えられている。一つは、局地前線に伴って発生する地表付近の渦に積乱雲に伴う強い上昇流が重なることで渦管が引き伸ばされ強い渦（竜巻）が生じる（Wakimoto and Wilson, 1989）。もう一つは前述したスーパーセル（巨大積乱雲）に伴って発生する場合であり（Browning, 1964）、日本で発生する竜巻の親雲の多くがスーパーセルである（水野，2007）。竜巻が発生すると、幅が数 10～数 100m、距離は数 km に渡って移動し、被害地域は帯状になる特徴がある。

(2) ダウンバースト

積雲または積乱雲の下で発生する下降気流であり、地上付近に破壊的な風の吹き出しを起こす。その発生する条件として 2 つあり（Wakimoto, 1985）、一つは大気の下層が乾燥し、中層が湿潤の場合、もう一つは大気下層が湿潤でその上が乾燥している場合がある。それぞれをドライダウンバーストおよびウェットダウンバーストといわれる。ドライダウンバーストは、半乾燥地帯でよく発生し、降水は記録されない。一方、ウェットダウンバーストは降水が発生する。1981 年～1994 年までの 13 年間で調査された日本で生じたダウンバーストのすべてがこのタイプであった（大野，1996）。また、森ら（2004）は、スーパーセルがダウンバーストを発生させると報告している。なお、このダウンバーストによる被害は福井県では 2002 年に 1 件発生している。

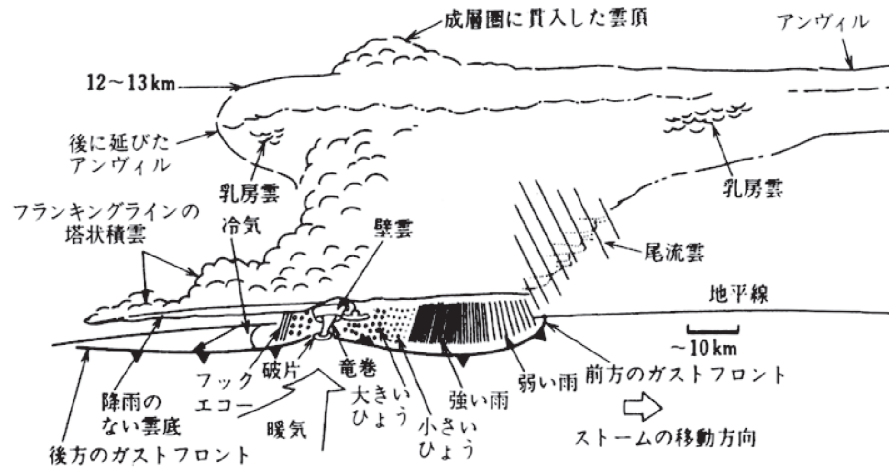


図1. 巨大積乱雲(スーパーセル)
H. Bluestein の未発表の論文による(小倉, 1997)

(3) ガストフロント

積雲や積乱雲の下で形成された冷たい空気のかたまりがその重みにより、周辺に流れ出ることによって発生する。流れ出る空気の先端は、冷気と周辺の暖かい空気との境界となり、そこで突風を生じさせる突風前線（ガストフロント）を形成する。水平の広がりには、竜巻やダウンバーストよりも大きく、数10km以上に達することもある。そのため、ガストフロントによる被害範囲も大きくなる可能性がある。福井県では2008年7月に敦賀市のイベント会場で生じた突風がこの現象であった。

2.2 藤田スケール(Fスケール)

竜巻そのものの強さを直接測定することは難しい。竜巻による被害地域は比較的狭く、その地域に風速計が設置されているとは限らず、設置されていたとしても、竜巻による風速は非常に大きいので破壊されてしまう。したがって、竜巻の強さは被害状況から推測している。現在利用されている竜巻の強さのスケールとして、藤田哲也氏（シカゴ大学）が提案した『藤田スケール（Fスケール）』（藤田, 1974）がある（表2）。過去に日本国内で発生した竜巻では、F3が最も強く、千葉県茂原市、愛知県豊橋市、および北海道佐呂間町で発生した竜巻が記録されている。最近では2012年5月に発生した北関東の竜巻があり、当初のF2からF3に修正された。また、福井県で発生した突風現象では、敦賀市（2001年）と丹生郡織田町（2002年）で発生した竜巻についてそれぞれF1と確認されている。なお、国内ではF4以上の報告はない。

表2 藤田スケール(Fスケール)の分類

スケール	風速		被害
F0	17~32 m/s	約15秒間の平均	煙突やテレビのアンテナが壊れる。小枝が折れ、根の浅い木が傾くことがある。空家が壊れるかもしれない。
F1	33~49 m/s	約10秒間の平均	屋根瓦が飛び、ガラス窓は壊れる。またビニールハウスの被害甚大。根の弱い木は倒れ、強い木の幹が折れたりする。走っている自動車が横風を受けると道から吹き落される。
F2	50~69 m/s	約7秒間の平均	住家の屋根がはぎとられ、弱い空家は倒壊する。大木が倒れたり、ねじ切られる。自動車が道から吹き飛ばされ、列車が脱線することがある。
F3	70~92 m/s	約5秒間の平均	壁が押し倒され住家が倒壊する。空家はバラバラになって飛散し、鉄骨づくりでもつぶれる。列車は転覆し、自動車が持ち上げられて飛ばされる。森林の大木でも、大半は折れるか倒れるかし、引き抜かれることがある。
F4	93~116 m/s	約4秒間の平均	住家がバラバラになって辺りに飛散し、弱い空家は跡形なく吹き飛ばされてしまう。鉄骨づくりでもベシャンコ。列車が吹き飛ばされ、自動車は何十メートルも空中飛行する。1トン以上もある物体が降ってきて、危険この上ない。
F5	117~142 m/s	約3秒間の平均	住家は跡形もなく吹き飛ばされるし、立木の皮が剥ぎ取られてしまったりする。自動車、列車などが持ち上げられて飛行し、とんでもないところまでとばされる。数トンもある物体がそこからともなく降ってくる。

3. 国内において過去に生じた竜巻の発生の特徴

3.1 発生分布および発生件数

図2に1961年から2010年に発生した竜巻の発生分布(気象庁)を示す。竜巻の発生地域は特定しておらず、全国の広い範囲においてどこでも生じる可能性がある(図2)。特に、日本海側および太平洋側において沿岸地域に集中して発生している。また、関東平野にも多く発生している。

1991年以降2010年までの20年間に於いて、発生が確認されている日本で生じた竜巻(竜巻およびダウンバーストを含む)の数は306件であり、この期間において年間平均15個ほどである。表3に20年間に於ける都道府県別発生確認数の上位20位を示す。上位地域の中に沖縄県、宮崎県、高知県、鹿児島県の暖候地が、統計期間中20件以上の高頻度で発生している。一方、寒候地では、北海道が30件、秋田県および新潟県が16件、山形県9件など、竜巻の発生頻度は少なくない。また、竜巻の発生にはそれぞれの地域の持つ面積には大きく影響しないといえる。なお、福井県における竜巻発生個数は20年間で5件であり、全体の18位である。平均すると4年に1個の割合で発生することになる。

3.2 竜巻発生時の気象現象とその地域性

どのような気象現象のときに竜巻は発生しやすいのであろう。図3は竜巻発生時に生じていた総観場(水平距離が1000 km以上の空間スケール)の気象現象と竜巻の件数を表している。これによると、最も竜巻が発生しやすい気象現象は寒冷前線が発達しているとき(67件)であり、次いで暖気の移流(61件)、台風(54件)である。ここに示される気象じょう乱はいずれも、大気が不安定であり対流現象が生じやすい気象条件下で発生する現象である。天気図上で前線や低気圧等の現象が現れていなくても、鉛直方向において上層と下層の温位差が顕著となる大気現象(たとえば、下層からの暖気の移流、上層からの寒気の移流)によって、活発な上昇気流により対流性の積乱雲を発生させる。積乱雲が発生しやすい環境にあれば、それに伴う突風等の激しいじょう乱が生じる可能性がある。なお、夏季の太平洋高気圧の周辺に沿って時計回りに日本付近に流入する暖気の移流により対流不安定となり、突風を引き起こす積乱雲が発生するが、これ以外の高気圧(移動性高気圧、大陸高気圧など)ではその可能性が低いため突風は発生しない。加えて、竜巻発生において、地形効果が直接原因になることは統計的にも可能性は低いことが示されている(図3)。



図2 竜巻(ダウンバーストを含む)の発生分布図 ●印は発生点を表す。(気象庁資料)

表3 道府県別発生確認数順位(1991年～2010年)

都道府県	発生個数	順位
沖縄県	37	1
北海道	30	2
宮崎県	21	3
高知県	20	4
鹿児島県	20	4
秋田県	16	6
愛知県	16	6
新潟県	16	6
山形県	9	9
茨城県	8	10
埼玉県	8	10
石川県	8	10
和歌山県	8	10
東京都	7	14
千葉県	7	14
静岡県	7	14
山口県	6	17
神奈川県	5	18
福井県	5	18
佐賀県	5	18
福岡県	4	21
長崎県	4	21
青森県	3	20
岐阜県	3	20
富山県	3	20

※気象庁竜巻データベースにもとづき作成

次に、竜巻が発生するときの気象現象の地域性を検討した。表 3 において示した竜巻発生確認数の多い上位 20 都道府県について、同期間のデータに基づき、竜巻（竜巻またはダウンバースト）が発生したときの総観場の気象現象についての地域別発生件数を表 4 に示した。表中の地域区分は、太平洋側地域（千葉、神奈川、静岡、愛知、高知、宮崎、鹿児島、）、日本海側地域（青森、秋田、新潟、山形、富山、石川、福井、山口、佐賀、福岡、長崎）、および沖縄県、北海道とした。

竜巻現象を引き起こしやすい寒冷前線の存在は、太平洋側 18 件、日本海側 19 件であり、寒冷前線の発生に伴う竜巻は全国どこでも発生する可能性が高いといえる。また太平洋側では、台風が最盛期で通過することが多く、南からの暖気の移流の影響も大きいといえる。一方、日本海側では寒気の移流および気圧の谷に伴って発生する場合が多く、高層からの寒冷な空気の流入による対流不安定が原因となる。また、局地性じょう乱は、寒冷期に日本海上空に発生する“寒冷渦”と呼ばれる、低気圧よりも空間スケールの小さなじょう乱である。小規模スケールで現象の寿命も短い、激しい現象を

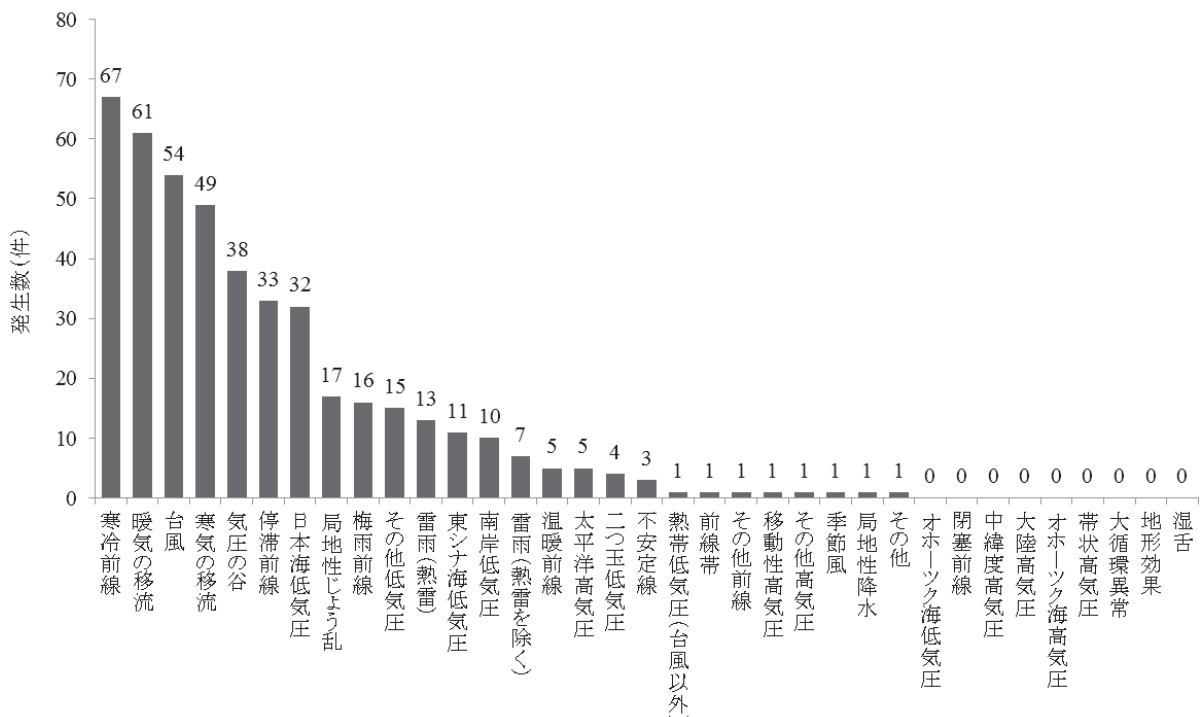


図 3 竜巻現象が発生したときの総観場の気象現象別の件数(気象庁竜巻データベースにもとづき作成)

表 4 竜巻現象が発生したときの総観場の気象現象の地域別発生件数(単位:件)

地域	20 年間で発生頻度が高い気象現象(他の現象と複合的に発生したものを含む)								
	寒冷前線	暖気の移流	台風	寒気の移流	気圧の谷	停滞前線	日本海低気圧	局地性じょう乱	梅雨前線
太平洋側	18	24	32	4	1	8	17	0	8
日本海側	19	9	2	24	24	9	7	11	4
沖縄県	11	12	8	0	3	7	0	0	1
北海道	16	5	0	10	8	0	0	1	0

※気象庁竜巻データベースにもとづき作成

引き起こす。この現象に伴って発生する竜巻は日本海側地域に特有な発生原因であるといえる。

4. 福井県における突風の発生

4.1 発生場の特徴

過去（1978年～2011年）に福井県で発生した現象で竜巻、またはその他の突風現象として確認されているものは22件である。表5に気象庁の竜巻データベースに記録されている福井県における竜巻等突風現象を示す。発生地域別にみると、22件のうち、6件が海上、4件は嶺南地方（うち1件は湖上）、残りの12件が嶺北地方である。生じた突風現象は、竜巻として確認されたものが13件、ダウンバースト1件、ガストフロント1件である。これらの現象は、藤田スケールF0～F1の被害規模で生じていることから、突風現象が生じやすい総観場の気象現象が発生した場合だけでなく、発生が予測された段階において注意を喚起された場合にも災害対策を意識する必要がある。福井県では寒気の移流が生じた場合に突風現象が発生しやすく（8件）、この現象は嶺北地方で多くみられる。一方、2002年7月に三国町（現坂井市）で生じた現象では、前日の台風7号の上陸において日本列島に湿潤空気が入り込んだ状況で、日本海上に寒冷低気圧が発生し、上層に寒気が流入することで地上付近に激しいじょう乱を発生させたと考えられる。これは表5で示したように日本海側に特徴的な気候特性である。

全国ならびに福井県における突風現象が生じた時期および発生時刻について、月別および時刻別のそれぞれの発生頻度をそれぞれ図4および図5に示す。全国における統計によると、竜巻の発生（全

表5 福井県における竜巻等突風現象(気象庁竜巻データベースより)

地域	市町または海上	現象	発生日	藤田スケール	総観場の気象現象
嶺北	あわら市	竜巻または漏斗雲	2011/3/9	F0未満	寒気の移流
	坂井市	その他(不明を含む)	2011/3/9	F0	寒気の移流
	勝山市	その他(不明を含む)	2004/7/9	不明	雷雨(熱雷)
	南条郡河野村	その他(不明を含む)	2002/12/11	不明	寒気の移流
	丹生郡織田町	ダウンバースト	2002/10/15	F0～F1	寒冷前線
	坂井郡三国町	その他(不明を含む)	2002/7/17	不明	雷雨(熱雷を除く)・寒気の移流
	坂井郡春江町	その他(不明を含む)	2002/1/11	不明	寒冷前線
	坂井郡三国町	竜巻	2000/7/25	不明	停滞前線
	福井市	竜巻	2000/7/25	不明	停滞前線
	坂井郡三国町	その他(不明を含む)	1999/12/20	不明	日本海低気圧
	坂井郡三国町	竜巻	1980/2/2	記録なし	大陸高気圧・寒気の移流
	三国町	竜巻	1978/1/5	記録なし	不明
嶺南	敦賀市	ガストフロント	2008/7/27	F0	停滞前線・暖気の移流
	今立郡今立町	その他(不明を含む)	2002/9/1	不明	台風
	敦賀市	竜巻	2001/6/19	F1	日本海低気圧
	(湖上)	竜巻	1991/2/15	F1	二つ玉低気圧
海上	海上	竜巻	2010/11/29	不明	寒気の移流
	海上	竜巻	2010/11/29	不明	寒気の移流
	海上	竜巻または漏斗雲	2010/11/29	不明	寒気の移流
	海上	竜巻	2008/10/27	不明	寒気の移流
	海上	竜巻	2003/10/18	不明	暖気の移流
	海上	竜巻	2002/11/5	不明	寒気の移流

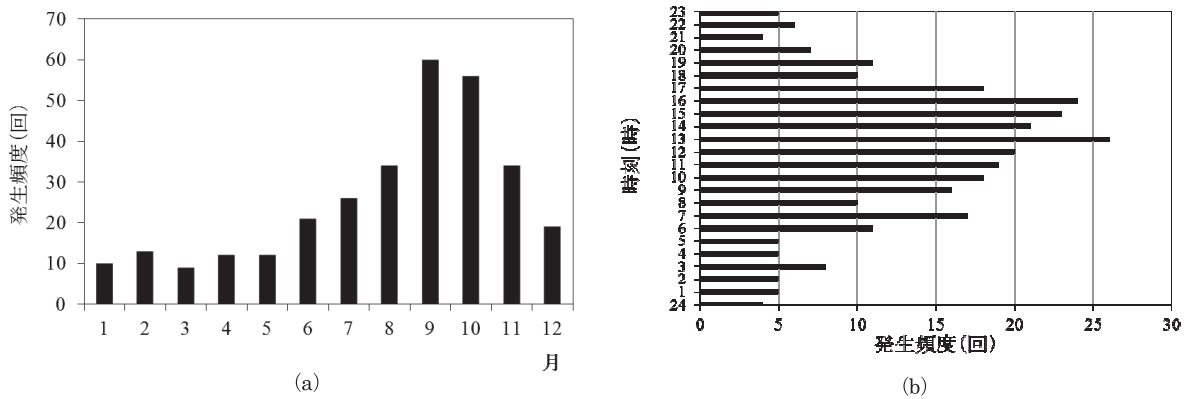


図4 全国における突風現象の月別発生頻度(a) および月別発生頻度(b)
(1991～2010)

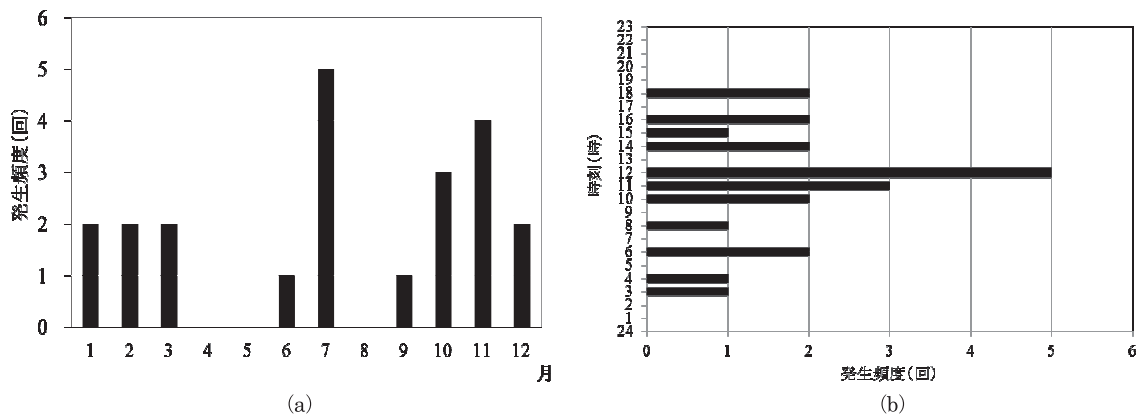


図5 福井県における突風現象の月別発生頻度(a) および月別発生頻度(b)
(1978～2011)

発生頻度 306 回) は 9 月が最も発生頻度が高く (19.6 %), 次いで 10 月 (18.3 %) であり, 秋季に多く発生している (図 4 (a))。これは, 台風や寒気の南下に伴う竜巻が発生するためである。一方, 福井県における頻発月は, 7 月に最も多発しており (5 回), 次いで 11 月 (4 回) である (図 5 (a))。ここでは福井県における突風発生件数が少ないため, 全国との発生傾向の比較は難しい。しかしながら, 福井県で 7 月にピークが出現することについては, 総観場の気象現象 (表 5) から二つのことが考えられる。梅雨前線から派生した日本海上の停滞前線や低気圧の発生に伴い, その周辺に温暖湿潤な気流, あるいは上空からの寒気が流入することで対流不安定になり, それによって発生する積乱雲に起因する。もう一つは, 南東方向からの山越え気流によるフェーン現象による地表付近の気温上昇のために発生する雷雲を伴った積乱雲発生によって生じる。季節特性としてみると, 10 月から 3 月の晩秋から初春において発生頻度が高い。これは大陸からの寒気が県内上層に侵入し上昇気流が発生しやすい時期であるために頻度が上がることがいえる。また, 発生時刻は, 全国では, 13 時をピークに頻度の高い発生時刻は日中の時間帯である (図 4 (b))。同様に, 福井県においても, 日中に発生することが多く, 12 時にピークがある (図 5 (b))。この理由としては, 日昇後, 巨大積乱雲にまで十分に成長するための時間が必要であることが推測される。

4.2 過去に発生した顕著な事例

(1) 2008 年 7 月 27 日に発生したガストフロント

日本海に停滞した前線 (図 6 (a)) に, 太平洋の高気圧の周辺に沿って日本列島に流入した暖かく湿った風が吹き込み, 福井県内で積乱雲が発達した。この積乱雲が県内の西から東へ通過し, 積乱雲

の前面に発生した下降流と対流雲セルの外側にある暖かい空気とがぶつかることで、そこに突風前線が生じたため(図1参照)、周辺域に突風を発生させた。このことから、この突風現象はガストフロントであると、藤田スケールはF0とされた。この日の突風発生時刻の前後の気象庁観測の気象レーダー画像(図6(b))を見ると、発生時刻午後12時50分には降雨強度の弱い雲群の前面に被害地域が存在する。ガストフロントが生じた地域の周辺では、降雨現象が観測されないか、あるいは弱い雨域であり、積乱雲進行方向後方に降雨強度の大きな領域が存在する。この規模の大きな積乱雲が通過するまでには40分ほどであった。突風現象が生じた12時50分の敦賀では最大瞬間風速29.7 m/s(突風率(後述)2.72)であった。その他の地域において、小浜では午後12時25分ごろ26.7 m/s(12時20分ごろの突風率2.06)を観測している。また、敦賀市における突風発生約1時間後の14時ごろに、石川県小松市においてもダウンバーストが生じている。いずれも、福井県に突風現象をもたらした巨大積乱雲に起因する現象であると推測される。

当日の被害状況は、敦賀市港町の金ヶ崎緑地公園で行われていたイベント会場において大型テントが倒壊し、参加者のうち10人が死傷する惨事となった(福井新聞, 2008)。

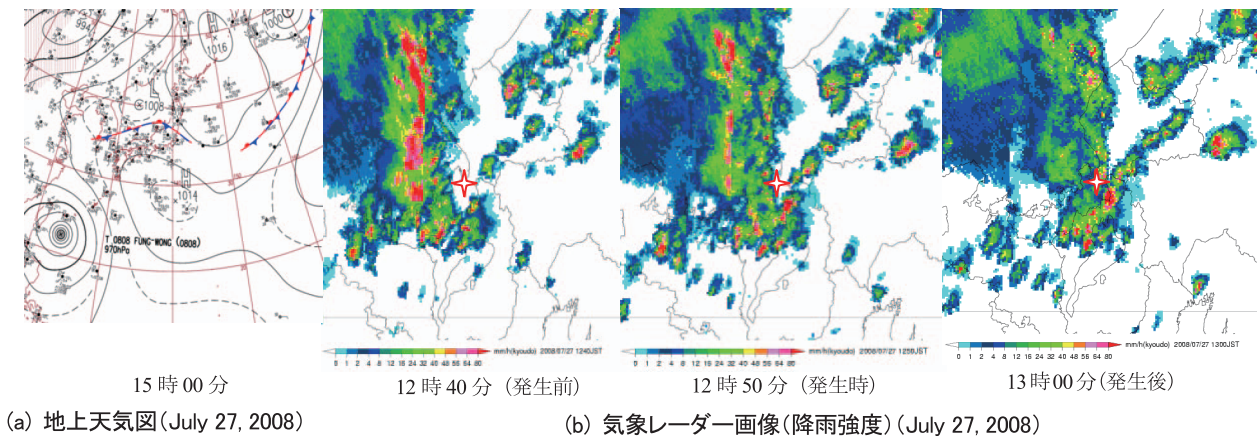
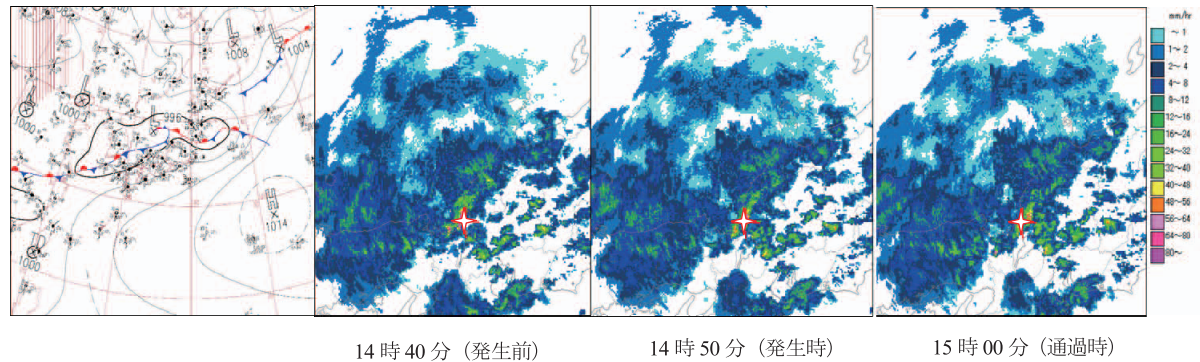


図6 2008年7月27日に敦賀市で生じたときの地上天気図(a) および気象レーダー画像(b)
図中の十字印は竜巻等発生地点を示す。

(2) 2001年6月19日に発生した竜巻

日本海上の梅雨前線に南から湿潤な暖気が流入し、大気の状態が不安定となり、積乱雲が発生しやすい状態であった。地上天気図(図7(a))を見ると、日本海上に低気圧があり、それから西側に伸びる寒冷前線の通過に伴う雨雲が、気象レーダー画像(図7(b))によって認められる。また、低気圧の発生・発達に伴って、“バルジ”と呼ばれる北側へふくらんだ上層雲域が確認できる。この日、レーダー観測の結果から高度12,000 mの対流圏界面まで達するような巨大な積乱雲が発生した。突風発生時刻の前後の気象レーダー画像(図7(b))を見ると、14時40分には発達した雨雲(降雨強度約40~60mm/hr)が西側から福井県の嶺南地方に移動しようとしているところであり、竜巻発生ポイント(図7(b)に示す十字印)は、図1(前出)で示される地上付近におけるストームの前部の弱い雨の領域に一致する。その後、降雨強度30~60mm/hrの雨雲が通過し、強雨域が通過した直後の14時50分から15時00分にかけて突風が生じた(図7(b))。福井県内において、当時は瞬間最大風速観測を行っていなかったため、被害状況からその値は40~50 m/sと推定された。被害地域は東西2 kmの帯状におよび、白い煙状のものを見たという複数の目撃があった。気象庁はこれらの現象を竜巻であると、藤田スケールはF1と記録された。

当日の被害状況は、突風でトラック2台が吹き飛ばされ横転し、街路樹20本以上が根こそぎ倒壊した。そのほか民家の屋根瓦が落ちるなどの被害が生じた(福井新聞, 2001)。



(a) 地上天気図(June 19, 2001)

(b) 気象レーダー画像(降雨強度)(June 19, 2001)

図 7 2001 年 6 月 19 日に敦賀市で生じたときの地上天気図(a) および気象レーダー画像(b)
図中の十字印は、竜巻等突風発生日点を示す。

5. 福井県内地域における突風発生 の 傾向

5.1 最大瞬間風速発生 の 地域特性

風には息があり、その向きや強さは時々刻々と変化し、地域によってその傾向は異なっている。福井県内における風の強さの地域性を調べるために図 8 に示す県内における気象台および気象測候所 6 地点（三国、福井、大野、敦賀、越廼、小浜）で観測された風速の 10 分間平均風速データおよび最大瞬間風速データを使用して解析を行った。これらのデータは 2008 年に竜巻注意報が発表されるようになって以降、各地点で順次観測を開始されており、各観測開始日は様々である。解析期間および各期間内における使用データ数を表 6 に示す。

観測地点における最大瞬間風速の発生傾向を捉えるために、風速別の最大瞬間風速の出現率を季節ごとに図 9 (a) ～ (d) に示した。なお、季節区分は、春期が 3 月～5 月、夏期 6 月～8 月、秋期 9 月～11 月、冬期 12 月～1 月である。福井県内において、季節を通して最大瞬間風速が 15 m/s を越える強い風（台風並みの風）の出現率は、各地点で 8%未満であるが、その中でも、夏期においては 20 m/s 以上の風速の出現率は非常に小さく、沿岸域においても、その出現率は敦賀 0.01%、三国 0.02%および小浜 0.04%である。また、どの地点も 15 m/s 以上 20 m/s 未満は出現率 0.5%よりも小さい。また、年間 15 m/s 以上の出現頻度が高い地点は沿岸域に位置する三国、敦賀および小浜の 3 つの地域であり、春期では、敦賀 4.3%、次いで三国 3.5%、小浜 3.2%の順である。秋期では三国 2.1%、敦賀 1.8%であ



図 8 福井県内における解析地点

表 6 各地点の解析期間とデータ数

地点	観測開始日 年月日	解析に使用したデータ		
		期間	10 分間平均風速 有効データ数*	最大瞬間風速 有効データ数*
三国	2009.3.5	2009.4.1～2012.5.31	169737	169709
福井	2008.6.25	2008.7.1～2012.5.31	205894	205946
大野	2008.3.26	2008.4.1～2012.5.31	205783	208236
敦賀	2008.6.25	2008.7.1～2012.5.31	205783	205804
越廼	2008.11.26	2008.12.1～2012.5.31	183968	183948
小浜	2009.3.7	2009.4.1～2012.5.31	197133	197145

※有効データ数*とは、全観測日数から欠測データおよび資料不足値・推定値を除いたデータ数。

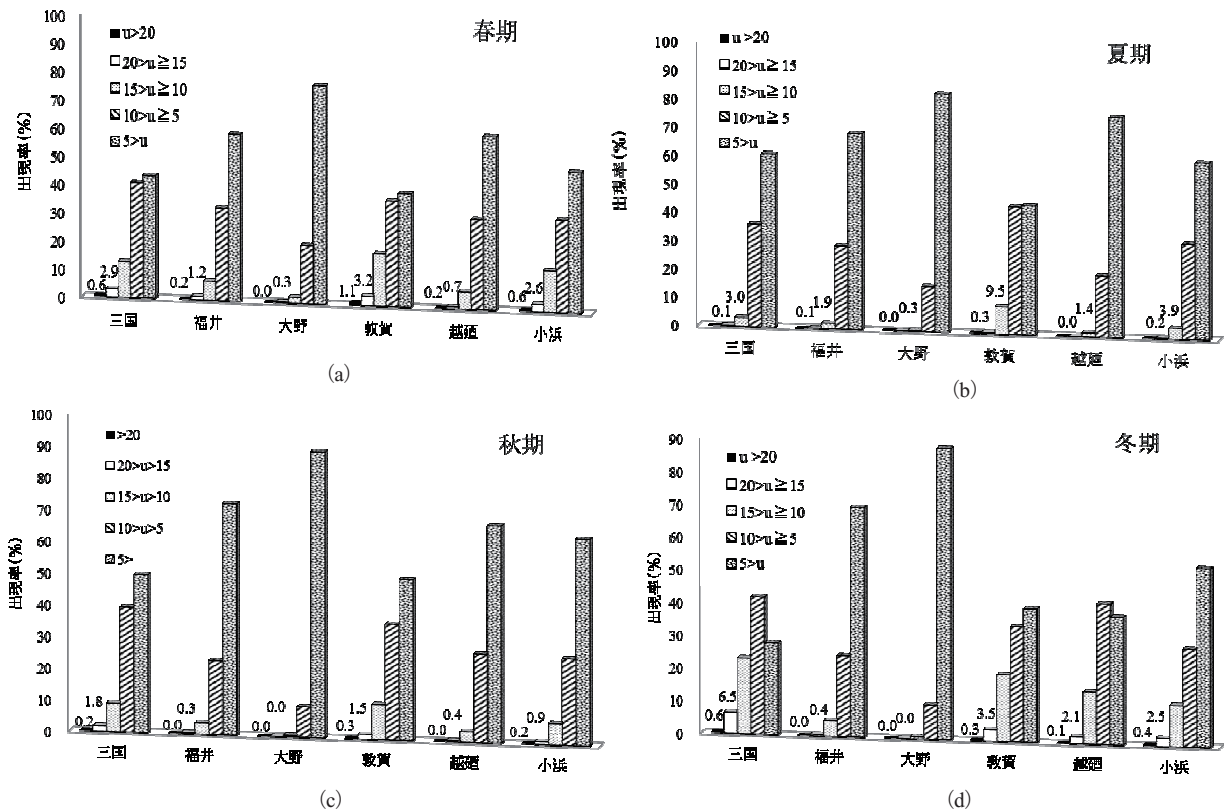


図9 解析地点における季節ごとの瞬間最大風速出現率分布

図中凡例の記号 u は瞬間最大風速を表し、棒グラフ上に付した数値は、出現率(%)の補足表示である。

るが、越廼では 0.4% と出現頻度は低い。なお、春期および秋期ともに風速出現分布は、三国と敦賀、越廼と福岡がそれぞれ類似している。最も顕著に風速出現の差が現われるのは冬期であり、三国では 15 m/s 以上の風は全風速分布の 7.1% の割合であり、相対的に頻度が高い。このとき敦賀では 3.8% であり、三国の約 2 分の 1 の出現率である。冬期の大陸からの寒気の吹き出しによる影響は、敦賀地点では北西側に位置する敦賀半島によって抑制される。このことから敦賀では、冬期に相対的に大きな風速を発生させるじょう乱が生じることが少ない傾向にあると推測される。また越廼において冬期には、他のシーズンと比較して、5 m/s より小さな風速が著しく減少し、10 m/s 以上の風速が多く、冬期全体の風速分布は三国と類似する。越廼と三国は沿岸域に位置していることから、季節風が卓越する冬期に同様な風況を示すといえる。内陸部にある大野では、年間を通して 5 m/s より小さな風速分布であり、風況は穏やかな地域であるといえる。

ここで検討した最大瞬間風速がすべて突風現象として現れるわけではなく、被害をもたらすような突風の出現については、各地点における突風率を用いて次項で考察する。

5.2 解析地点の突風出現の傾向

突風とは、急に吹く強い風で継続時間の短いものである。それが継続する場合には、「暴風」とよぶ(気象庁)。突風率は最大瞬間風速値と 10 分平均風速値との比であり、次の式で求められる(小倉, 1997)。

$$\text{突風率} = \frac{\text{最大瞬間風速 (m/s)}}{10 \text{ 分間平均風速 (m/s)}}$$

10 分間平均風速は、通常天気予報で表現される風速を指す。10 分間平均風速(平均風速と呼ぶ)が 5 m/s であっても、突風率が 3 を示せば最大瞬間風速は 15 m/s の強風が生じることになる。突風率の大きさや頻度を見ることによって、その地域における突風の生じやすさや突風の生じる際の風

表 7 各地点の季節における平均風速区分による突風件数および発生率
表中の記号 v は 10 分間平均風速を表す。

		突風率																		
季節区分	風速場 (平均風速区分)	1.5以上2未満						2以上3未満						3以上						
		三国	福井	大野	敦賀	越廼	小浜	三国	福井	大野	敦賀	越廼	小浜	三国	福井	大野	敦賀	越廼	小浜	
春期	5≦ v <10	発生数(件)	5571	5377	1105	10625	1321	8589	844	423	321	488	744	807	1	1	2	1	45	0
	10≦ v <15		404	321	16	996	49	551	12	5	0	51	12	41	0	0	0	0	0	0
	15≦ v		17	15	0	103	0	37	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	5≦ v <10	発生率(%)	86.8	92.7	77.4	95.6	62.6	91.4	13.2	7.3	22.5	4.4	35.3	8.6	0.02	0.02	0.1	0.01	2.1	0
	10≦ v <15		97.1	98.5	100	95.1	80.3	93.1	2.9	1.5	0.0	4.9	19.7	6.9	0	0	0	0	0	0
	15≦ v		100	100	0	100	0	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
夏期	5≦ v <10	発生数(件)	752	2400	196	8150	17	3242	135	63	44	177	63	145	0	0	1	0	1	3
	10≦ v <15		6	5	0	50	0	62	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0
	15≦ v		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	5≦ v <10	出現率(%)	84.8	97.4	81.3	97.9	21.0	95.6	15.2	2.6	18.3	2.1	77.8	4.3	0	0	0.4	0.0	1.2	0.1
	10≦ v <15		85.7	0	0	98.0	0	98.4	14.3	0	0	2.0	0	1.6	0	0	0	0	0	0
	15≦ v		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
秋期	5≦ v <10	発生数(件)	4034	3196	154	7292	667	3515	454	235	111	298	207	403	2	1	1	0	7	2
	10≦ v <15		221	39	0	366	30	114	9	1	0	22	1	15	0	0	0	0	0	0
	15≦ v		2	0	0	8	0	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	5≦ v <10	発生率(%)	89.8	93.1	57.9	96.1	75.7	89.7	10.1	6.8	41.7	3.9	23.5	10.3	0.04	0.03	0.4	0	0.8	0.05
	10≦ v <15		96.1	97.5	0	94.3	96.8	88.4	3.9	2.5	0	5.7	3.2	11.6	0	0	0	0	0	0
	15≦ v		100	0	0	100	0	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
冬期	5≦ v <10	発生数(件)	9502	3031	253	10759	5902	7729	1563	643	95	652	2103	965	7	1	0	0	21	1
	10≦ v <15		687	13	0	657	231	539	40	3	0	6	3	24	0	0	0	0	0	0
	15≦ v		2	0	0	3	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	5≦ v <10	発生率(%)	85.8	82.5	72.7	94.3	73.5	88.9	14.1	17.5	27.3	5.7	26.2	11.1	0.06	0.03	0	0	0.3	0.01
	10≦ v <15		94.5	81.3	0	99.1	98.7	95.7	5.5	18.8	0.0	0.9	1.3	4.3	0	0	0	0	0	0
	15≦ v		100	0	0	100	0	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

表 8 各地点の季節における平均風速区分による突風発生率
表中の記号 v は 10 分間平均風速を表す。

季節区分	風速場 (平均風速区分)	突風率1.5以上の発生率(%)					
		三国	福井	大野	敦賀	越廼	小浜
		三国	福井	大野	敦賀	越廼	小浜
春期	5 ≤ v < 10	26.4	36.8	62.1	27.3	18.5	35.1
	10 ≤ v < 15	1.7	2.1	0.7	2.6	0.5	2.2
	15 ≤ v	0.07	0.10	0	0.3	0	0.1
夏期	5 ≤ v < 10	3.66	15.62	10.5	20.5	0.7	12.7
	10 ≤ v < 15	0.03	0.03	0	0.1	0	0.2
	15 ≤ v	0	0	0	0	0	0
秋期	5 ≤ v < 10	18.5	21.8	11.6	18.6	7.7	14.6
	10 ≤ v < 15	0.9	0.3	0	1.0	0.3	0.5
	15 ≤ v	0.01	0	0	0.0	0	0.03
冬期	5 ≤ v < 10	45.6	23.3	15.1	28.0	70.3	32.4
	10 ≤ v < 15	3.0	0.1	0	1.6	2.0	2.1
	15 ≤ v	0	0	0	0.01	0	0.02
年間出現率		100	100	100	100	100	100

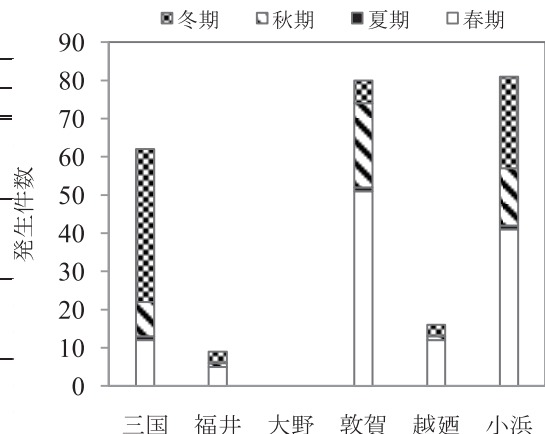


図 10 各地点における平均風速 10m/s 以上のときの突風率 2 以上の突風出現件数

の場の特徴を捉えることができる。ここで行った解析の条件は、平均風速の区分を 5m/s 以上 10 m/s 未満、10 m/s 以上 15m/s 未満、15m/s 以上と 3 つに分類し、その風速区分で風が生じたときに出現する 10 分毎の突風率が 1.5 以上 2 未満、2 以上 3 未満、3 以上であるときの突風の回数を各地点についてカウントした。表 7 に季節ごとの平均風速区分における突風率別の発生件数を地点別に示した。また、表 8 には季節ごとの平均風速区分における突風率 1.5 以上の発生件数の合計を地点別に示した。

1 年を通して全地点において、平均風速区分が 5～10m/s の範囲では突風率 1.5～3 で突風が発生している（表 7）。地点別でみると、日本海沿岸域に位置する三国、敦賀、越廼、小浜の各地点間で突風発生 の 傾向は大きく異なり、特に越廼では、他の 3 地点と比較して突風率が 2 以上の突風現象が生じやすい。たとえば、春期における平均風速 5～10m/s の風速場で突風が生じるとき、突風率 1.5 は、越廼を除く他の沿岸域の 3 地点では 86～95% の出現率であるが、越廼では 62% の出現率（1321 件/2110 件）である。また、突風率 2 が 35%（744 件/2110 件）、突風率 3 が 2%（45 件/2110

件)で出現している(表 7)。さらに、突風率 3 の年間の出現傾向をみると、越廼では各季節において 1 回以上は出現しており、春期でその頻度は高い。一方、三国および敦賀では、竜巻等突風現象による災害が記録されているにも関わらず、突風率 3 の風が出現することは少ない。しかしこれは、日常的に平均的な風速が大きいため、平均風速が 10m/s 程度であり突風率が 2.7 のときでも、最大瞬間風速が 29.7m/s となるような突風が発生し、災害が引き起こされることもある(4.2 項)。したがって、突風率だけで判断するのではなく、その地域の平均風速の程度に基づいた突風率の発生傾向を把握することが必要となる。

内陸部に位置する大野については、最大瞬間風速 5 m/s 以下の風が多く、風況は穏やかであることを前項で述べた。しかし、突風率で解析すると、春期で平均風速区分が 5～10m/s で突風率 3 が 2 回出現しており、10～15 m/s においては突風率 1.5 が 16 回出現している。これは、最大瞬間風速が 10～20m/s で吹くことになり、日常的に大きな風速がほとんど生じない大野においても、風速が 15m/s 程度の突風が生じる可能性があることを把握しておくことが重要である。

さらに、災害が生じる可能性が高くなる風速場、つまり最大瞬間風速が 20 m/s 以上で発生する可能性として、各地点における平均風速が 10m/s 以上かつ突風率 2 以上の突風発生件数を図 10 に示した。季節区分における傾向をみると、夏期の突風は越廼を除く沿岸域のみで発生しているが、その割合は他の季節と比較して極めて小さい。このことから夏期に発達する海風侵入による突風の影響はあまり及んでいないと考えられる。しかし、このように福井県では夏期に突風発生が少ない傾向にあるにも関わらず、統計的には夏期に災害が生じる回数が多く(図 5 (a))、敦賀では F0～F1 規模の竜巻等突風災害が生じている(前出の 2 事例)。このことは、総観場で積乱雲を発達させるような気象状況であるときは、敦賀地域周辺の入り組んだ複雑な沿岸地形のために、異なる方向の気流や岬の影響が、局地的な突風をもたらす親雲(積乱雲)にまで発達させる起因となっていると考えられる。

6. おわりに

本報告において、気象庁の竜巻データベースおよび気象統計値に基づき、国内の竜巻発生の地域特性および福井県内で生じた竜巻等突風発生特性についての気候学的解析を行った。その結果、福井県の突風発生について以下のことが分かった。

- (1) 竜巻等突風現象は日本国内において、国内の広範囲でどの地域でも生じる可能性があり、福井県ではこの 20 年間に竜巻と確認された突風現象は 5 件であった。
- (2) 国内において、竜巻現象が生じる総観場の気象現象には地域性があり、太平洋側では主に台風発生時に発生頻度が高く、日本海側では寒気移流、前線、局地的じょう乱の発生など、多様な気象現象の下で発生しやすい。福井県では、日本海側の特徴を典型的に示していた。
- (3) 発生頻度の高い時期について、全国の発生傾向は秋冬であった。福井県では発生件数が少なく、全国のそれと比較することは難しいが、7 月にピークがあり、加えて秋から春にかけて広い時期に発生しやすいことが分かった。
- (4) 突風率からみた突風発生の気候的特徴は、福井県では夏期に突風が生じる回数が少ない。夏期に敦賀で発生した災害をもたらす突風は、積乱雲が発生しやすい総観場の気象条件下においては沿岸域の局所的に複雑な地形の影響が起因していると考えられる。

地域の突風特性をより正確に捉えるためには、地域別の突風の出現がどのような総観気象の下でもたらされるかについてのさらなる解析が必要である。それによって、より詳細な竜巻等の突風現象の発生の可能性についての知識を加えることができるであろう。

2006 年 9 月に宮崎県延岡市で生じた竜巻(F2)および同年 11 月に北海道佐呂間町で生じた竜巻(F3)の発生を受けて、2008 年に気象庁が『竜巻注意情報』の発表を開始した(滝下, 2009)。本研究で取

り上げた事例のひとつである 2008 年 7 月 27 日に福井県敦賀市で生じた竜巻 (F0) に対して、竜巻注意情報第 1 号の発令を行ったが、それは事故発生の直後であった。竜巻注意報を発令したにもかかわらず、その地域内において発生ポイントを特定することが難しいため、注意報の範囲が県内全体と広く、信頼性に欠ける。情報提供のタイミングの困難さ等により、現在においても人的被害を軽減するに至っていない。

現在の公的な防災体制の下、突発的に生じる現象に対する被害を最小限に食い止めるには、自分の住む地域の気候的特徴を把握しておくことは意義があることである。これまでに分かっている竜巻等突風現象の兆候は、①黒い雲が近づき、急に暗くなる、②雷鳴が聞こえたり、雷光が見えたりする、③冷たい風が吹き出す、④大粒の雨やひょうが降りだす、と示されている (気象庁)。年間を通して風況的に穏やかな地域であっても、また、突風が生じやすいにもかかわらず、重大な災害に至っていない地域であっても、ここに挙げた兆候に加えて、風の場の地域性を理解しておくことが防災において大切である。

引用文献

朝日新聞, 2012, 5 月 6 日付, 5 月 8 日付

大野久雄, 鈴木修, 楠研一, 1996, 日本におけるダウンバーストの発生の実態, 天気, 43, 101-112.

小倉義光, 1997, メソ気象の基礎理論, 東京大学出版会, P133-153.

気象庁 HP <http://www.jma.go.jp/jma/index.html>

瀧下陽一, 2009, 突風に関する防災気象情報の改善ー竜巻注意情報の発表開始ー, 天気, 56 (3), 168-175.

福井新聞, 2001, 6 月 20 日付, 6 月 22 日付

福井新聞, 2008, 7 月 28 日付, 7 月 29 日付, 8 月 1 日付

藤田哲也, 1973, たつまきー渦の驚異ー上, 共立出版, 228 pp.

水野孝則, 新野宏, 小林文明, 鈴木修, 加藤輝之, 坪木和久, 田村幸雄, 赤枝健治, 海老原智, 2007, 気象研究所主催「竜巻シンポジウム」報告, 天気, 54, 889-898.

森真理子, 高谷美正, 2004, 関東地方で発生した降ひょう・ダウンバーストを伴ったスーパーセルの事例解析, 天気, 51 (8), 567-580.

Browning, K., 1964, Airflow and precipitation trajectories within severe local storms which travel to the right of the winds, Journal of Atmospheric Science, 21, 634-639.

Wakimoto, R.M and J.W.Wilson, 1989, Non-supercell tornadoes, Monthly Weather Review, 117, 1113-1140.

Wakimoto, R.M., 1985, Forecasting Dry Microburst Activity over the High Plains, Monthly Weather Review, 113, 1131-1142.